

超精密ガラス成形技術「スランピング法」に用いる超精密金型研磨加工自動化技術の開発と成形ガラス表面精度向上への応用

研究報告者 篠崎 烈

プロフィール



最終学歴 2007年9月
熊本大学大学院 自然科学研究科
金属工学専攻 博士課程修了

専門分野 超精密加工, 精密計測, 技術者教育

学 位 博士 (工学)

所属団体 有明工業高等専門学校 創造工学科
メカニクスコース

役 職 名 准教授

今後の抱負

この度、三井金型振興財団様より研究助成をいただき、飛躍的に研究を推進することができました。心から感謝申し上げます。

いただきましたご支援を基に、有明高専の専攻科生および本科生が熱心に研究に取り組み、自身の技術と知識を身に付けて卒業していきました。高専教員として研究環境を整えて学生達を指導し、私自身も刺激を受けながら日々成長していきたいと考えていますので、学生達をエンジニアとして送り出すことが最大の喜びです。また、企業や財団の皆様から研究に対するご支援をいただきますので、これに対して、継続的に研究成果を導きながら、発信していきたいと思えます。そして、それ以上に、頂いたご支援で育った「若い技術者のたまご」をモノづくりの世界に送り出すことに取り組んでいきたい、これが今後の研究者として、教員としての抱負です。私も、まだまだ成長途中ですので、皆様からの叱咤激励を頂きながら成長していきたいと思えます。

1. 緒言

本研究は、2010年から本格的に研究を開始し、2016年に打ち上げられたX線天文衛星ASTRO-H搭載の硬X線望遠鏡「ひとみ」に使用されるような「スーパーミラー」をはじめとする将来の宇宙天文学を支える製造技術を検討、開発するものである。現在使用されているスーパーミラーは、「レプリカ法」と言われる成形技術によって、アルミ薄板製のものが製作されている。主な製作工程は以下の通りである。

【レプリカ法①】

ガラスメーカーより、数ナノメートルの表面粗さと形状精度のガラスチューブを選定して購入する。

【レプリカ法②】

ガラスチューブの周りに接着剤と反射素材をコーティングし、アルミ薄板を手動で押し付けてガラスチューブ形状に変形させる。

【レプリカ法③】

ガラスチューブから、アルミ薄板を離型してスーパーミラーが完成する。

上記の方法では、ガラスチューブは直径300mm～500mm、長さ400mm程度のもので表面粗さは優れているが、形状精度は数ミクロン程度でばらつきが大きく、選定に時間を要する。また、アルミ薄板は手動で押し付けて成形されることから、最終的なミラー精度が一様にならないという問題点がある。これらの問題点は、望遠鏡本体に設置する際の案内部品によって調整されているのが実情である。これらの問題点を改善するために、ガラスチューブに代わるものとして無電解ニッケル製の金型による手法が開発された。しかしながら、超精密切削された金型精度はガラスチューブと同程度の表面粗さにするために、共同研究先の学生の手作業によって仕上げられている。当然ながら、手作業による仕上げ加工では表面粗さは小さくなるが、形状精度が悪化することが想定される。また、加工時間も100時間程度と、非常に長くなるという問題点がある。最終的な硬X線望遠鏡には1200枚を超えるミラーが必要となり、製作期間を短縮して製造コストを低くするためには製造工程の自動化が求められる。2016年に打ち上げられた「ひとみ」は、運航調整段階の不具合により2ヶ月で使用不可能となり、JAXAは2020年に後継機を打ち上げるとしているが、その製作においてもスムーズには進んでいないのが実情である。

そこで、将来の機体に関する開発も遅れており、将来を見据えた製造技術として、本研究では、図1に示すような、ガラス板を用いたスーパーミラー製造技術「スランピング法」を提案して、実験を主として研究している。求められるミラーの表面粗さは rms 3nm以下、形状精度50nm以下という非常に高い精度であり、ガラス本来の精度を生かして、ガラスの熱変形を利用した成形技術である。スランピング法の工程は以下の通りである。

【スランピング法①】 耐熱性に優れたステンレスSUS310S製金型を製作する。

【スランピング法②】 金型の上にミラー素材となるガラス板を載せて固定する。

【スランピング法③】 炉内で、ガラスの軟化温度 670℃付近で 120 分程度過熱して変形させる。

【スランピング法④】 破壊しないように炉内で徐冷して離型し、ミラー形状が完成する。

本加工技術は、従来の厚さ 0.2mm のアルミ製スーパーミラーに代わって、ガラス素材を採用した超精密スーパーミラー形状の製作技術であり、精密工学に関する分野において、①ステンレス製金型の研磨技術、②金型を用いた熱変形によるガラス成形技術、に関する研究成果として報告している。また、提案する「スランピング法」は宇宙望遠鏡の分野だけでなく、自由形状の光学部品製造技術への応用も期待できると考えられる。スーパーミラーのみならず、「製造時間」と「製造コスト」を削減する手法として、期待される技術の 1 つである。

このような背景から、本助成研究では、[1]円筒金型の装置開発を含めた研磨加工技術の検討、[2]スランピング法における金型表面粗さが成形ガラス表面粗さに及ぼす影響を解明することを目的として検討を行った。

具体的な目標は、以下の通りとした。

- ①直径 200mm 程度のステンレス金型を超精密研磨する「横型センタレス研磨機」を開発、製造する。
- ②製作した超精密研磨加工装置を用いて表面粗さ Ra 10nm 以下となる金型を製作する。
- ③超精密研磨された金型を用いたスランピング法を実施し、金型表面粗さがガラス製品の表面粗さに及ぼす影響を実験によって検証する。

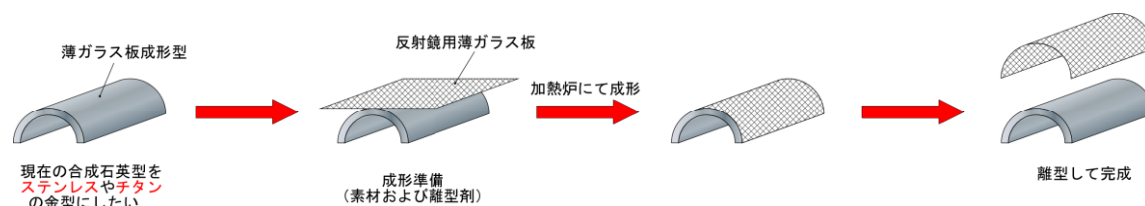


図 1 The glass forming process by “slumping method”

2. ステンレス鋼 SUS310S の超精密研磨加工

ガラスの熱変形特性を利用した本加工技術では、金型は加工精度や再利用性などを考慮して、比較的耐熱性に優れた素材であることが求められる。このようなことから、従来から検討しているステンレス鋼 SUS304 よりも、さらに耐熱性に優れた SUS310S による金型を製作して、スランピング法への適用を検討した。

表 1 にステンレス鋼 SUS310S を研磨加工した際の加工条件を、図 2 に研磨加工前および後の金型外を示す。金型は直径 50mm、厚さ 10mm (円筒金型は高さ 60mm) の耐熱系ステンレス鋼 SUS310S で、端面および円筒面をスウェードタイプの研磨パッドによって精密研磨している。研磨点にはアルミナ砥粒 0.5% の研磨液を 1 時間当たり 50ml ずつ供給している。加工面の観察はデジタルマイクロスコープで行い、仕上げ面粗さは、小型表面粗さ測定機 (SJ-201, ミツトヨ) により測定した。また、後述するスランピング法は、小型電気炉 (NHK-120-H, 日陶科学) を用いて、厚さ 2mm のソーダ石灰ガラスに対して行った。成形条件は、ガラスの軟化点である 670℃付近で約 120 分の加熱時間とし、急冷による割れを防ぐために炉冷とした。

表 1 Experiment conditions

Polishing machine	Bench type polishing machine MA-200, Musashino denshi, Co., Ltd
Workpiece material	Stainless steel SUS310S in JIS
Polishing pad	Suede type
Polishing liquid	0.5% - alumina polishing liquid (Abrasive grain size = 5 μ m)
Polishing ondition	Polishing pressure 1.7 [kPa]

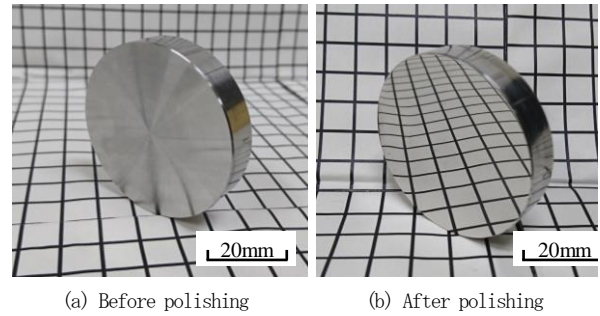
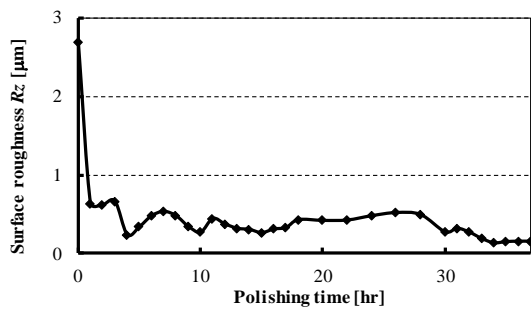


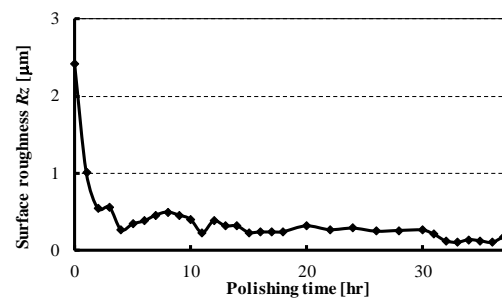
図 2 Comparison of before and after polishing workpieces [SUS310S, 0.5%-Al₂O₃ polishing liquid, 1.7 kPa]

図 3 に、金型端面の各領域における最大高さ粗さ R_z の時間的変化をまとめた結果を示す。超精密研磨加工を 1 時間行った仕上げ面では、図 3(a) に示すように、中心から半径方向 20mm 程度の位置である外側部分で $R_z=0.64\mu\text{m}$ となり最も小さくなった。2 時間後以降の仕上げ面では微小な変化を繰り返しながら、全面がほぼ同程度の速さで減少した。超精密研磨加工 15 時間程度では、 $R_z=0.25\mu\text{m}$ 程度となり、ほぼ一定の表面粗さとなった。そして、超精密研磨加工を 37 時間行った仕上げ面は、 $R_z=0.16\mu\text{m}$ 程度となった。一方、中心から 5mm 程度の位置の中央付近では、外側と同様の傾向を示しながら仕上げ面粗さが減少していくことが確認できる。

過去の研究結果から、 R_z が $1\mu\text{m}$ 以下になるまでに、0.1kPa 負荷時には約 18 時間、研磨圧力 0.5kPa 負荷時には約 5 時間を要することが分かっている。今回の実験では研磨圧力 1.7kPa を負荷しており、 $R_z=1.0\mu\text{m}$ 以下になるまでの加工時間は約 2 時間である。これらの結果から、研磨圧力を比較的高く設定することで研磨効率が向上し、研磨に必要な時間を削減できることが分かる。



(a) Outside of workpiece ($r = 20 \text{ mm}$)



(b) Inside of workpiece ($r = 5 \text{ mm}$)

図 3 Surface roughness of polished SUS310S surface [SUS310S, 0.5%-Al₂O₃ polishing liquid, 1.7 kPa]

図 4 に、超精密研磨加工前および 37 時間研磨後のステンレス金型端面の表面粗さを示す。図 4(a) に示す加工前の表面粗さでは、図 2(a) で確認できた切削条痕を示す工具送り量間隔の凹凸が存在することが分かる。その表面粗さは、 $R_a=0.4\mu\text{m}$ 、 $R_z=2.7\mu\text{m}$ である。1 時間の研磨加工により切削条痕は非常に小さくなり、その表面粗さは $R_a=0.07\mu\text{m}$ 、 $R_z=0.66\mu\text{m}$ となった。さらに研磨加工を行い、37 時間研磨後には図 4(b) に示すように切削条痕が全く確認できなくなるまで研磨加工が進んでいることが分かる。その表面粗さは $R_a=0.01\mu\text{m}$ 、 $R_z=0.10\mu\text{m}$ となり、使用する触針式粗さ計での最高精度まで到達したことを意味する。

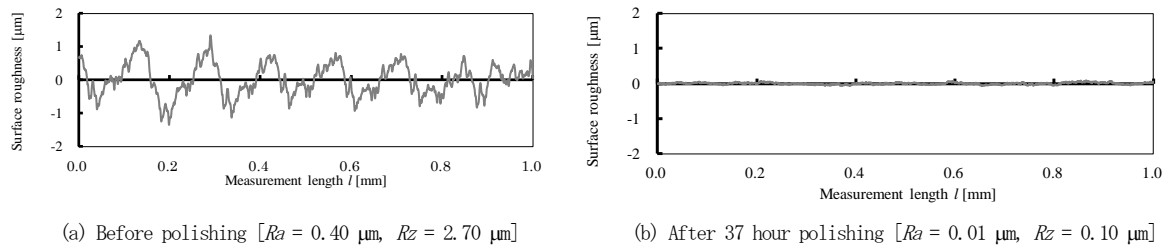


図4 Surface roughness of polished SUS310S surface

超精密研磨面をさらに詳しく調べるために、超精密研磨加工 37 時間後の仕上げ面を非接触式表面形状測定機 (NewView7100, zygo) で測定した結果を図 5 に示す. この測定機では、白色干渉計による 3 次元平面での粗さ測定が可能であり、測定範囲 $180\mu\text{m} \times 140\mu\text{m}$ 程度の領域の表面粗さは、算術平均粗さ $S_a=1.8\text{nm}$ 、最大高さ粗さ $S_z=20.4\text{nm}$ であった. X 線望遠鏡のスーパーミラー製造用の金型は、算術平均粗さ 2nm 以下の精度が要求されるため、本研究でもそれを目標としており、この測定結果から円盤状金型の端面において目標を達成した SUS310S の仕上げ面を得ることができたとと言える.

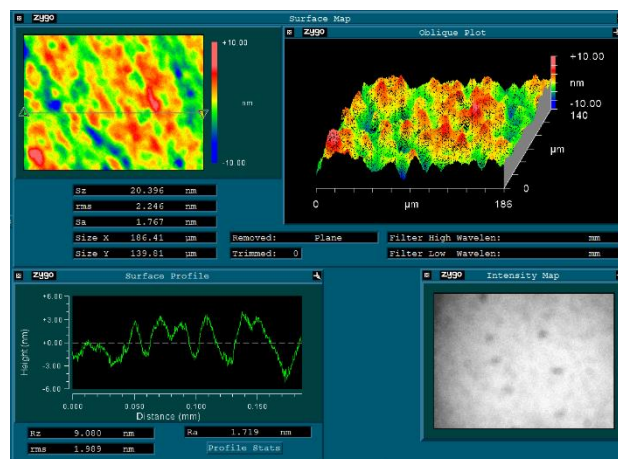


図5 SUS310S after 37 hr of polishing measured with NewView7100

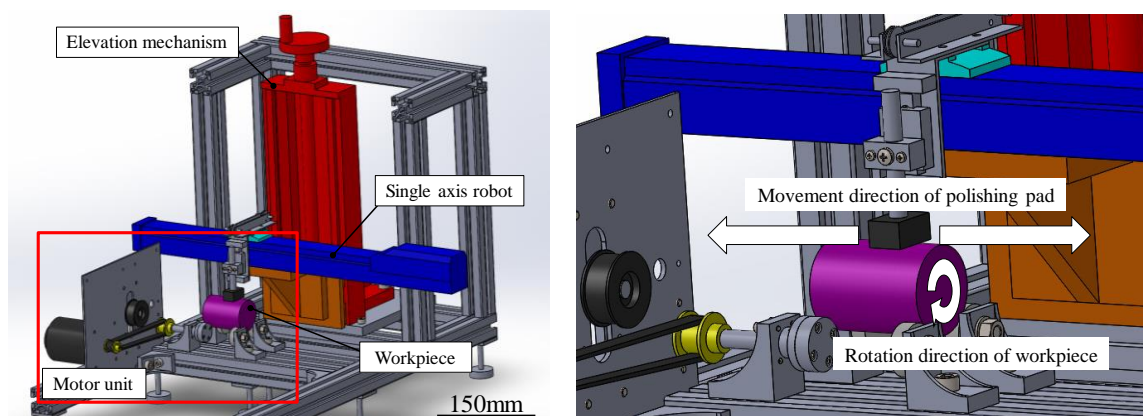
3. 横型センタレス研磨加工機の開発

本研究では、円筒金型の円筒部分にガラス板を載せ、ガラスの軟化点に加熱してガラス成形を行う「スランピング法」について検討している. 金型円筒面の研磨加工は比較的難しく、より滑らかな表面粗さの金型加工をするためには、専用の装置を開発することが必要であると考えた. このような背景により、先行研究で得られた結果を考慮した研磨加工装置を設計して実際に製作した. 装置開発のコンセプトは以下の通りである.

- [1]円筒形金型の円筒面を自動的に研磨加工する.
- [2]金型を回転させ、同時に円筒面の軸方向に研磨加工する.
- [3]一定の研磨圧力で加工する.

[4] 研磨する金型の大型化を考慮してセンタレス支持とする。

使用される金型形状は、切削加工によって創成されるため、表面には切削条痕が刻まれている。この条痕を研磨して滑らかにするために、[2]に示すように切削条痕と直角方向に研磨することが必要となる。また、上述したように大きな金型では重量が100kgを超えるものもあり、工作物のセンタを支持して加工する形式では非常に高い剛性が必要となる。このことを踏まえて、金型円筒部分を回転体で支持するセンタレス形式の研磨加工機として設計、製作した。図6および図7に、3次元CADで設計して、製作した横型センタレス研磨加工機の外観を示す。図6(b)に示す加工機では、単軸ロボットを使って研磨部を軸方向に動かす機構を採用している。また、研磨圧力はデッドウェイト方式で調整しており、直径200mmの工作物に対しても一定の研磨圧力で円筒面研磨加工を行うことができる設計となっている。



(a) 3D model of Centerless polishing machine

(b) Polishing method on the machine

図6 Designed “centerless polishing machine to polish cylindrical SUS310 molding die” with 3D CAD

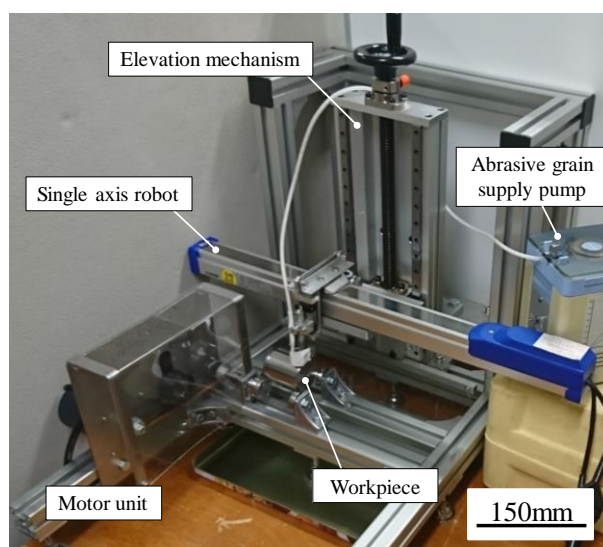


図7 Overview of centerless polishing machine

図7に示す、製作された横型センタレス研磨加工機を用いて、ステンレス鋼SUS310S金型の研磨加

工実験を行った。直径 50mm×長さ 60mm の小型の円筒金型を、アルミナ研磨液 (#3000, 0.5%, 50ml/h) およびスウェードタイプの研磨パッドで加工した。

図8に、ステンレス鋼金型円筒面を研磨加工した際の研磨時間と算術平均粗さ Ra の関係を示す。なお、表面粗さは、金型中央centerおよび端部edgeを測定した。本実験では、centerおよびedgeのどちらにおいても同程度に表面粗さが減少し、研磨時間22時間で表面粗さ $Ra=0.12\mu\text{m}$ 程度まで小さくなった。製作された金型の表面粗さは目標値の10nm以下と比較すると十分ではないが、さらに加工することで表面粗さを小さくすることができると考えられる。さらなる高精度化と時間短縮は、今後の課題である。

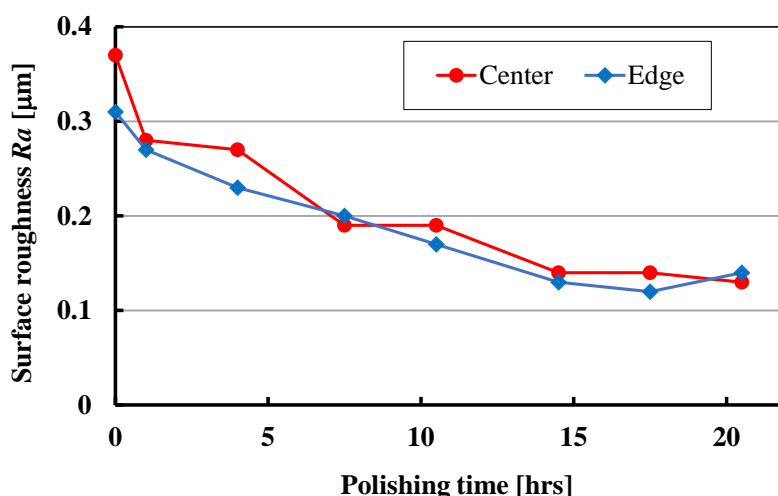


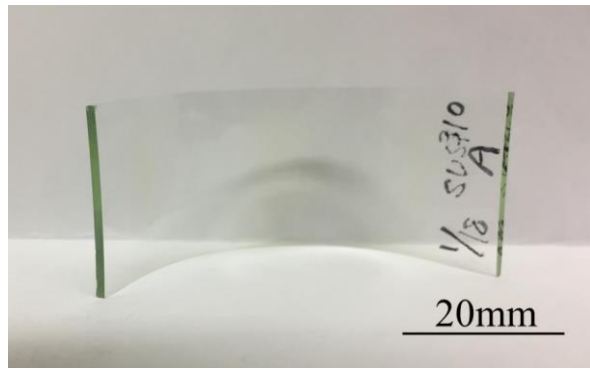
図8 Relationship between polishing time and surface roughness
[SUS310S, 0.5% Al_2O_3 liquid (50ml/h), Suede type polishing pad]

4. スランピング法における金型表面粗さがガラス表面粗さに及ぼす影響

図9に、精密研磨加工したステンレス鋼 SUS310S 金型を用いて小型電気炉内でガラス板をスランピング法により成形した様子、および成形後のガラス板の外観を示す。図9(a)に示すように、直径 50mm の金型上に置かれたガラス板が、熱変形によって金型形状に成形されていることが確認できる。一方、使用した金型は金属光沢を持った鏡面状態であったものが、熱によって変色しているのが確認できる。成形されたガラス板は、図9(b)に示されるように金型形状に沿って円弧状に変形しているのが分かる。ガラス板中央部の形状精度は $1\mu\text{m}$ 以下であり、比較的良好に成形されている。しかしながら、ガラス板端部は円弧形状に沿っておらず、ほぼ元の形状に近い状態である。今回使用したガラス板は厚さ 2mm のものであり、ガラスそのものが有する強度によって変形が進まなかったと想定される。一般的には、上部から加圧することで、全面に渡って成形することができるとされている。しかしながら、本研究の最終的なターゲットとするガラス板は、厚さ 0.2mm の液晶ガラスであることから、ガラス端の成形に対しても比較的可能になると考えられる。



(a) Overview of glass forming in the electric furnace



(b) Formed glass plate with SUS310S molding die

図9 Slumping method with SUS310S molding die for glass
[NHK120-H, 120 min at 670 °C in electric furnace]

図10に、スランピング法に用いた金型の加熱前後の表面粗さの変化、および成形したガラスの表面粗さを比較した結果を示す。表面粗さが異なる金型A, B, C, Dを製作し、それぞれの粗さは、図10に示す各棒グラフの左より0.28 μm , 0.13 μm , 0.10 μm , 0.08 μm である。これらの金型を用いてスランピング法によって成形したガラス板の表面粗さは、各グラフ右より0.02 μm , 0.02 μm , 0.03 μm , 0.04 μm である。ガラスの加熱前の表面粗さは0.02 μm 程度であることから、いずれの金型を用いた成形結果においても表面粗さは、ほぼ変化しないことが確認できた。また、一部では若干の表面粗さの悪化が見られたが、金型粗さほどに大きくなることはなかった。

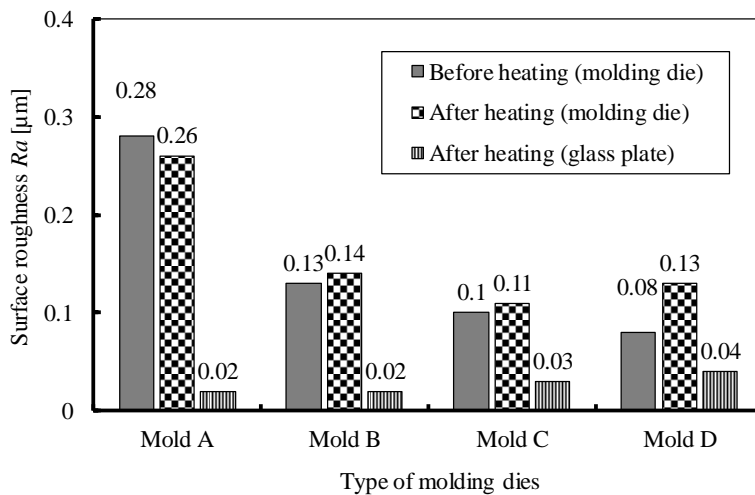


図10 Relationship between molding die surface and formed glass plate surface with slumping method
[NHK120-H, 120 min at 670 °C in electric furnace]

一般的に金型を用いた成形加工では、金型精度以上の製品を作ることは困難であるとされている。しかしながら、本研究で提案するスランピング法では、ガラス本来の表面粗さを維持したままでの、形状加工が可能であることを確認した。これは、熱軟化による変形では、金型表面の粗さ形状にガラスが溶

けて入り込むことはなく、大きな波形での変形現象となるためであると言える。

図 11 に、スランピング法に使用した各金型の外観を示す。いずれの金型においても、表面が熱焼けで変色しているのが分かる。今後、熱の影響の深さについても、検討を行う計画である。

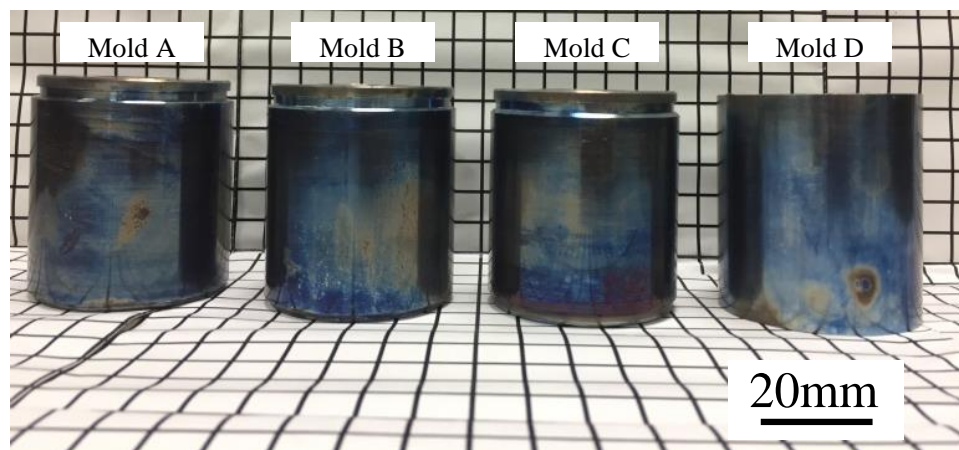


図 11 Used molding die surface at slumping method process
[NHK120-H, 120 min at 670 °C in electric furnace]

5. 結 言

本研究では、ガラス成形技術「スランピング法」に用いるステンレス鋼金型の高精度な加工技術の構築を目的として研磨加工実験や研磨加工機の製作を行った。また、製作した金型を用いたガラス板のスランピング法による精度検討を行い、以下に示す結果が得られた。

- 1) 円筒金型表面を研磨加工するために様々なコンセプトを検討し、加工機のセンタを支持し ない「横型センタレス研磨加工機」を製作することができた。
- 2) ステンレス鋼金型の円筒面を研磨加工し、表面粗さ $Ra=0.12\mu\text{m}$ 程度の円筒金型を製作することができた。今後は、さらなる高精度加工と加工時間の短縮が課題である。
- 3) 熱成形に使用した金型は表面が青黒く変色し、さらに表面粗さが悪化する。これは、ガラス軟化温度まで加熱されたことによって、酸化物や炭化物が発生したことによるものと考えられる。
- 4) スランピング法でガラス板を熱成形しても、ガラス板本来の数ナノメートルオーダーの表面粗さを維持することができ、金型表面粗さが成形ガラスの表面粗さに及ぼす影響は小さいことが分かった。今後は、形状精度への影響についても検討を行う。

謝 辞

本研究は、公益財団法人三井金型振興財団平成 30 年度研究助成を受けて遂行することができました。申請から、研究助成、各種手続き、研究遂行に対して温かいご助言をいただきました。全てに対して心から感謝、御礼申し上げます。

研究成果の発表

- (1)篠崎烈, 木下順平, 石橋大作, 坂本武司, 明石剛二, 難波義治: 精密ガラス成形加工技術「スランピング法」に及ぼす金型表面粗さの影響, 2018年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2018), pp. 248-249.
- (2)Junpei Kinoshita, Akira Shinozaki, Takeshi Sakamoto, Koji Akashi, Yoshiharu Namba : Precision polishing techniques for stainless steel SUS310S molding die used in glass forming technology “slumping method”, Proceedings of 17th International Conference on Precision Engineering, (2018), pn. B-3-5.
- (3)木下順平, 篠崎烈, 坂本武司, 明石剛二: 円筒金型研磨に用いる横型センタレス研磨加工機の開発, 2018年度精密工学会北九州地方講演会講演論文集, (2018), pp. 41-42.
- (4)坂本武司, 篠崎烈, 真島吉将, 峠 睦: 真空研磨法による電着砥石のツルーイングに関する研究, 2019年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集, (2019), pp. 103-104.
- (5)篠崎烈, 木下順平, 坂本武司, 明石剛二, 難波義治: ガラス成形技術「スランピング法」における金型表面粗さの影響, 日本機械学会 第13回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集, (2019), pp.406.
- (6)篠崎 烈, 坂本武司, 石橋大作, 明石剛二: 円筒金型研磨加工に用いる横型センタレス研磨加工機の開発, 2020年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文, (2020)

主担当者: 篠崎 烈 (有明工業高等専門学校)

共同研究者: 坂本武司, 明石剛二 (有明高専), 難波義治 (中部大学)

推薦者・研究支援者: 仙波卓弥 (福岡工業大学)